



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ SOFTWAREVÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ

EXPERIMENTAL SOFTWARE MUSICAL INSTRUMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zuzana Čapandová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Studentka: Zuzana Čapandová

ID: 174445

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální softwarový hudební nástroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je realizovat experimentální elektroakustický softwarový hudební nástroj; experimentálnost spočívá v netradičním způsobu řízení výsledného zvukového průběhu snímáním pohybu interpreta.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUŠTAR, M. Elektrofony I. Uvnitř, Praha, 2006. ISBN 978-80-239-8446-0.

[2] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvnitř, Praha, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá realizací experimentálního elektroakustického softwarového hudebního nástroje s netradičním způsobem bezkontaktního ovládání parametrů zvukového signálu pomocí pohybového senzoru Kinect. Software je realizován v jazyce C# s využitím knihovny NAudio.

Klíčová slova

Syntezátor, nelineární tvarování, hudba a pohyb, proměnná přenosová funkce, C# syntezátor, knihovna NAudio, Kinect a hudba

Abstract

This thesis focuses on realization of experimental electroacoustic software musical instrument, which uses non-contact sound parameters control via Kinect XBOX ONE motion sensor. The software is developed in C# using the NAudio open source library.

Key words

Synthesizer, nonlinear shaping, music and movement, dynamic transfer function, C# synthesizer, NAudio library, Kinect and music

Bibliografická citace

ČAPANDOVÁ, Z. *Experimentální softwarový hudební nástroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Experimentální softwarový hudební nástroj“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhého, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních anebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 8. 6. 2017

.....

Podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Danu Dlouhému, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a praktické rady ohledně vypracování dokumentu.

Obsah

Obsah	6
Úvod.....	4
1 Syntéza zvuku.....	5
1.1 Metody zvukové syntézy.....	5
1.1.1 Metody modulační (modulační syntéza)	6
1.1.2 Tvarové metody (tvarovací syntéza)	9
2 Problém nelineární charakteristiky	11
2.1 Rozdělení aproximací.....	11
2.1.1 Aproximace po částech přímkou	12
2.1.2 Aproximace polynomem	13
2.1.3 Aproximace exponenciální funkcí	14
2.1.4 Další možnosti aproximace	14
2.2 Určení koeficientů aproximační funkce	15
3 Vliv nelineární charakteristiky na vstupní signál	17
4 Kinect XBOX ONE.....	19
4.1 Specifikace	19
4.2 Kinect a vývojové prostředí Visual Studio	20
5 Softwarová aplikace hudebního nástroje	21
5.1 Knihovna NAudio	21
5.2 Zpracování dat z pohybového senzoru Kinect	23
5.3 Generátor.....	23
5.4 Výpočet a aplikace nelineárního zkreslení.....	24
5.4.1 Získání koeficientů tvarovací funkce	24
5.4.2 Algoritmus rychlé Fourierovy transformace	24
5.4.3 Výstupní signál.....	25
6 Popis hudebního nástroje.....	26
7 Srovnání hudebního nástroje s jinými podobně řízenými hudebními nástroji	27
7.1 Příklady nástrojů využívající senzor Kinect.....	27
7.1.1 Gestural Control of Modular Synthesis.....	27
7.1.2 Kinectar	28
7.1.3 3D Shere Virtual Istrument	29
7.2 Příklady nástrojů využívající jiné prostředky virtuální reality k propojení hudby a pohybu lidského těla	30
7.2.1 Hudební rukavice	30
7.2.2 Sound on Intuition.....	31

Závěr	33
Zdroje.....	34
Seznam použitých fyzikálních veličin a symbolů.....	37
Seznam příloh	37

Úvod

Předmětem této bakalářské práce je realizace experimentálního elektroakustického softwarového hudebního nástroje, který je zcela bezkontaktní a je ovládán pouze pohybem interpreta v prostoru. Díky tomuto nástroji tak můžeme propojit tvorbu elektronické hudby s pohybem lidského těla a vdechnout tak elektronicky generovanému zvuku život.

Na přelomu tisíciletí se civilizace začala posouvat díky moderním technologiím obrovskými skoky ve všech oblastech lidského života, a tedy i v tvorbě hudby. Čím dál více oblíbenou, a to nejen v zábavním průmyslu, se stává virtuální realita, kdy uživatel interaguje se simulovaným prostředím pomocí prvků snímající jeho pohyb. Tyto technologie se vyvíjejí mílovými kroky a jsou také snadno dostupné a ovladatelné. Proto jsem se rozhodla v mé bakalářské práci využít kreativního potenciálu interaktivních technologií na poli tvorby elektronické hudby pomocí pohybu lidského těla.

Hudební nástroj realizovaný v této práci bude tedy ovládán pomocí bezkontaktního interaktivního snímání pohybu lidského těla pomocí senzoru Kinect. Uživatel se tedy může pohybovat v prostoru a v závislosti na pozici jednotlivých částí jeho těla bude řízen tvar výstupního zvukového signálu.

Jako zdroj zvuku využívá tento hudební nástroj generátor harmonického signálu, jehož frekvenci uživatel může ovládat pohybem. Tento generátor je navíc obohacen o další frekvence. Tyto frekvence byly získány také pomocí pohybu interpreta, který tak udává frekvenci myšleného modulačního signálu a dává tak vzniknout novým frekvencím. Kromě generace základního tónu tedy hudební nástroj provádí taktéž frekvenční modulaci tohoto tónu a obohacuje tak spektrum výsledného signálu o neharmonické složky, které také vstupují do dalšího bloku hudebního nástroje.

K realizaci druhého bloku nástroje jsou využity principy zvukové syntézy pomocí nelineárního tvarování signálu. Principem tohoto bloku je tedy zkreslování vstupního signálu z generátoru pomocí pohybu interpreta. Můžeme si interpreta představit jako nelineární elektronický obvod, který neustále mění své parametry, a tak mění i harmonické zkreslení signálu v čase.

V této práci bude rozebrána problematika nelineárního tvarování a vzniku vyšších harmonických složek při průchodu zvukového signálu nelineárním obvodem. Je zde popsáno, jak získat z pohybu interpreta přenosovou funkci nelineárního systému pomocí aproximace a jak tuto přenosovou funkci aplikovat na signál dodávaný do obvodu generátorem.

Jak už bylo uvedeno výše, k ovládání hudebního nástroje je využito senzoru Kinect XBOX ONE s adaptérem pro připojení k počítači s operačním systémem Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 nebo Windows 10. Jsou zde uvedeny základní parametry tohoto zařízení, jeho možnosti a způsoby použití k ovládání hudebního nástroje.

Nakonec je zde představena aplikace experimentálního elektroakustického softwarového hudebního nástroje, která byla realizována v programovacím jazyce C# s využitím knihovny NAudio ve vývojovém prostředí Visual Studio 2012. Jsou zde diskutovány výhody i nevýhody tohoto přístupu k digitálnímu zpracování zvukového signálu.

1 Syntéza zvuku

Pojem syntéza hudebního signálu je nejčastěji obecně vnímán jako tvorba elektroakustické hudby, resp. jako elektrická generace signálů různých charakterů. Podstata syntézy však spočívá v poznávání obecných vlastností signálu. Pomocí tzv. analýzy (rozkladu) zvukového signálu, např. na základě Fourierovy transformace, jsou získány jednotlivé elementy zkoumaného zvukového signálu (základní frekvence a vyšší harmonické složky a jejich obálka). Pomocí syntézy jsou pak zvuky z jednotlivých složek složeny.

Souvislost barvy se spektrální strukturou je ve své podstatě odvozená od matematického modelu rozkladu zvukového signálu na základní frekvenční složky sinusového průběhu. Tento rozklad je pouze analytickým prostředkem syntézy. Syntézu zvukového signálu tedy nechápeme jen jako přechod od jednoduchého ke složitějšímu tvaru časového průběhu, ale především jako kvalitativní změnu jednoho signálu na druhý za účelem realizace zvukového záměru, tedy syntéza, která vždy čerpá z předchozího analytického procesu, je potom charakterizována změnou zvukově fyzikální kvality ve zvukově estetickou kvalitu. [28][29]

Hudební nástroje, které využívají syntézu zvuku jako princip svého fungování, nazýváme synteziátory. Jeho vstupem jsou řídicí signály a jeho výstupem výsledný zvuk. [3]

Tyto elektronické hudební nástroje mohou být hardwarové, které využívají analogového zpracování vstupních dat, nebo softwarové, ty využívají digitálního zpracování vstupních dat.

1.1 Metody zvukové syntézy

Z analytického pohledu na barvu zvukového signálu lze vymezit základní dimenze barvy přirozeného hudebního signálu:

- 1) Spektrum zakmitaného stavu
- 2) Časový vývoj složek
- 3) Frekvenční vztahy složek
- 4) Hlukové a šumové příměsi

Toto vymezení představuje základní analytický model zvukové syntézy. Syntéza zvukového signálu může být realizována několika způsoby. Jednotlivé metody provedení syntézy se navzájem odlišují v přesnosti a náročnosti jejího algoritmu. Nezávisle na použité metodě syntézy je nutné zabývat se naplněním každé uvedené dimenze. Všechny metody syntézy zvukového signálu působí na tvar časového průběhu signálu prostřednictvím frekvence, amplitudy, fáze nebo přímého řízení. [28][29]

Syntéza zvukového signálu může být prováděna těmito metodami:

- 1) Metody součtové (aditivní)
- 2) Metody rozdílové (subtraktivní)
- 3) Metody modulační
- 4) Metody tvarovací
- 5) Granulární syntéza

Následující podkapitoly budou zaměřeny na metody modulační a tvarovací, protože právě tyto metody jsou využity při realizaci tohoto hudebního nástroje.

1.1.1 Metody modulační (modulační syntéza)

Při použití modulačních metod syntézy je parametr vstupního hudebního signálu ovlivňován signálem modulačním. Tato změna může být periodická, neperiodická nebo jednorázová. Pomocí tohoto způsobu syntézy mohou být vytvářeny zajímavé průběhy. Mezi základní typy patří modulace frekvenční, amplitudová, fázová a spektrální. Tyto modulace převážně pasivně zpracovávají vstupní signál. Tzv. vyšší typy modulace se naopak aktivně podílejí na generaci nového signálu. Patří zde modulace kruhová, frekvenční (Chowningova) a parametrická. Ve všech případech metod modulačních se jedná o nelineární proces zpracování signálu, protože na výstupu vzniknou složky nové, které nebyly přítomny při vstupu signálu do systému. [28]

V této podkapitole je popsána frekvenční modulace vstupního signálu, protože právě jejího principu je také využito při vytváření hudebního nástroje, který je předmětem této bakalářské práce.

Při modulaci frekvenční dochází ke změně kmitočtu nosného modulovacího signálu modulujícím signálem. Kmitočet signálu modulujícího musí být nižší než kmitočet signálu nosného. [26]

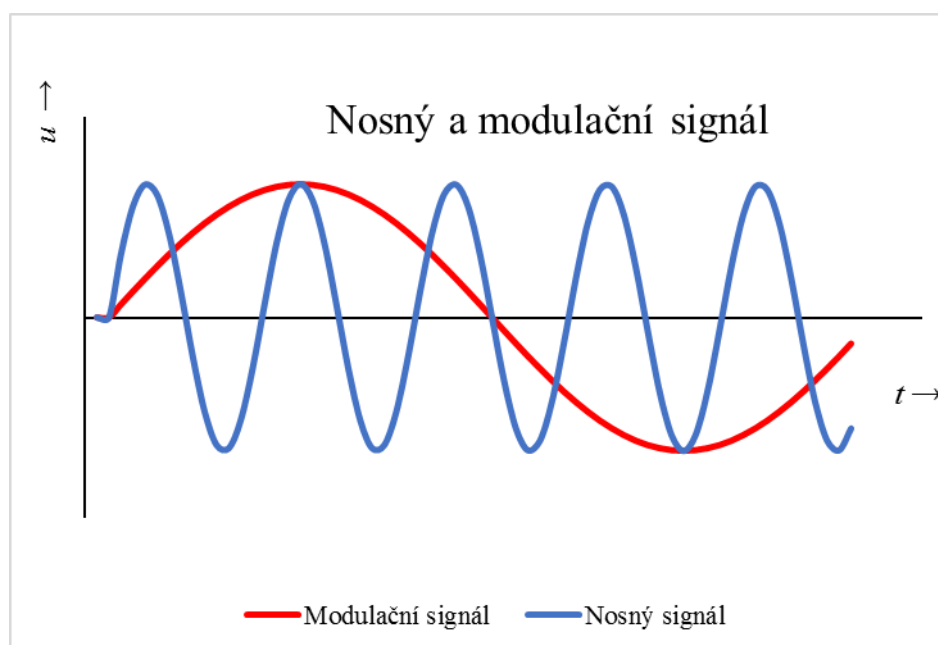
Mějme vstupním signálem modulačního obvodu harmonický signál, jeho průběh je zapsán rovnicí:

$$u_n = U_n \sin \Omega t \quad (2.1)$$

Modulační signál je zapsán následující rovnicí:

$$u_m = U_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

Kde Ω je nosná úhlová frekvence a ω je modulační úhlová frekvence. [20]



Obr. 1.1 Nosný a modulační signál

Pro účely frekvenční modulace budeme uvažovat, že počáteční fáze nosného i modulačního signálu je nulová. Tato veličina totiž nijak neovlivňuje fyzikální význam frekvenční modulace. Úhlová frekvence nosného signálu je ovšem v tomto případě závislá na čase. Důležitou jednotkou při popisu frekvenční modulace je frekvenční zdvih Δf . Je definován jako maximální změna nosné frekvence odpovídající maximální amplitudě napětí modulačního signálu. Tomuto frekvenčnímu zdvihu pak odpovídá úhlová frekvence $\Delta\Omega$. [20][9]

Frekvence původního nosného signálu tedy mění svou hodnotu v závislosti na čase takto:

- 1) Je-li okamžitá hodnota amplitudy modulačního signálu kladná, frekvence modulovaného signálu se zvyšuje v porovnání se signálem nosným v závislosti na amplitudě.
- 2) Dosahuje-li okamžitá hodnota amplitudy modulačního signálu záporných hodnot, frekvence modulovaného signálu se snižuje v porovnání se signálem nosným v závislosti na amplitudě.
- 3) Má-li amplituda modulačního signálu nulovou hodnotu, frekvence modulovaného signálu je rovna frekvenci signálu nosného.

S rostoucí amplitudou modulačního signálu roste také maximální odchylka frekvence modulovaného signálu od frekvence nosného signálu. Tyto krajní odchylky představují zmiňovaný frekvenční zdvih Δf . [9]

Závislost úhlové frekvence je potom definovaná vztahem:

$$\Omega(t) = \Omega + \Delta\Omega \cos \omega t \quad (2.3)$$

Dle následujícího postupu určíme fázi harmonického průběhu modulovaného signálu $\phi(t, \omega)$. Je-li fáze počáteční fáze nulová, je fáze harmonického průběhu popsána:

$$\Omega = \frac{d\phi(t, \omega)}{dt} \quad (2.4)$$

Platí tedy:

$$\phi(t, \omega) = \int \Omega(t) dt = \int (\Omega + \Delta\Omega \cos \omega t) dt \quad (2.5)$$

Po integraci je výsledný tvar fáze modulovaného signálu popsán následujícím vztahem:

$$\phi(t, \omega) = \Omega t + \frac{\Delta\Omega}{\omega} \sin \omega t \quad (2.6)$$

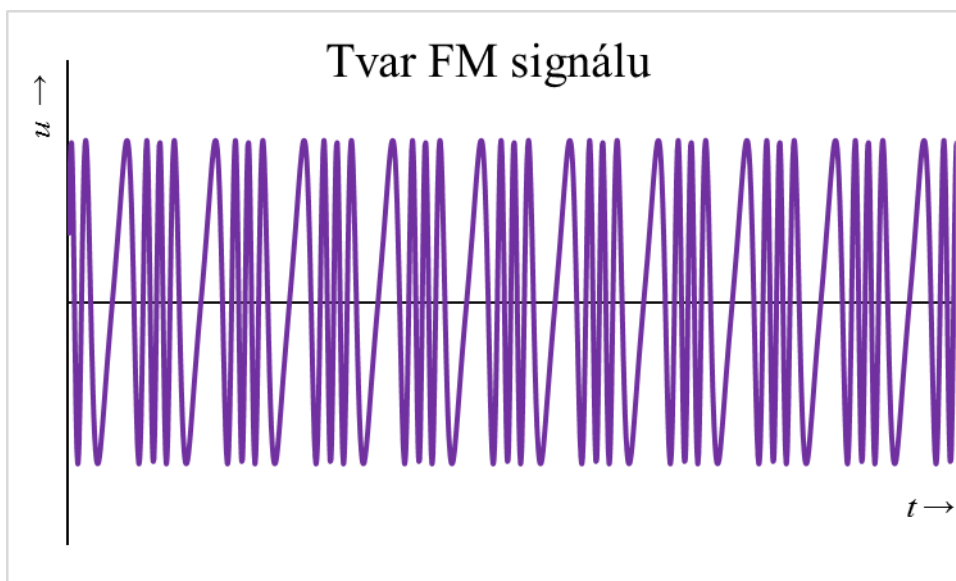
Dále je definován parametr modulační index frekvenční modulace m_{FM} , který je určený vztahem:

$$m_{FM} = \frac{\Delta\Omega}{\omega} = \frac{2\pi \cdot \Delta f}{2\pi \cdot f_m} \quad (2.7)$$

Kde f_m je frekvence modulačního signálu. [9]

Výsledný tvar frekvenčně modulovaného signálu tedy odpovídá vztahu:

$$u = U_n \sin(\Omega t + m_{FM} \cdot \sin \omega t) \quad (2.8)$$

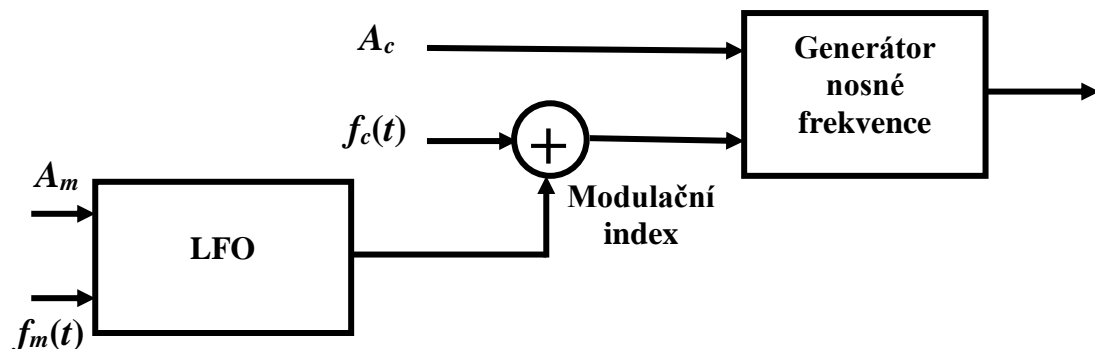


Obr. 1.2 Frekvenčně modulovaný signál

Frekvenční spektrum tohoto signálu je možné získat aplikací Besselových funkcí I. druhu, což jsou nelineární funkce n -tého řádu, v případě frekvenční modulace mají ve svém argumentu m_{FM} . Tyto funkce mají charakter tlumených kmitů. Jsou definovány jako:[9]

$$J_n(m_{FM}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{m_{FM}}{2}\right)^{n+2k}}{k! \cdot (m + k)!} \quad (2.8)$$

Pomocí goniometrických identit vztahu 2.8 a následného dosazení Besselových funkcí získáme obraz jednotlivých frekvencí vzniklých frekvenční modulací signálu. Je tedy možné popsat výstupní spektrum signálu.



Obr. 1.3 Blokové schéma frekvenční modulace

Pro dosažení frekvenční modulace se nejčastěji využívá generátor signálu nízkých frekvencí LFO, který je přiveden na výstup vstupního (nosného) signálu. Generátor LFO tedy představuje modulační signál.[26]

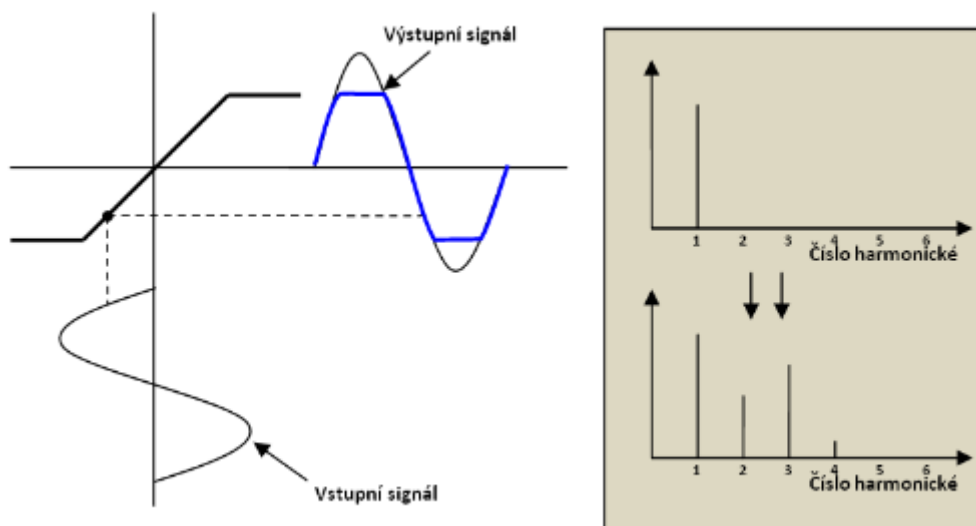
1.1.2 Tvarové metody (tvarovací syntéza)

Dalším typem syntézy využitý v této bakalářské práci k vytvoření hudebního nástroje je použití myšleného nelineárního obvodu, který zkresluje harmonický signál a dodává do spektra výstupního signálu vyšší harmonické složky. Toho může být dosaženo použitím tvarovacích metod.

Tyto metody jsou založeny na principu přímého působení na signál v jeho časové oblasti, nebo realizace požadovaného tvaru jeho časového průběhu. Jedná se o metody založené na principu nelineárního procesu zpracování signálu. [28]

Metoda nelineárního tvarování byla vyvinuta Jean-Claude Rissetem na konci 60. let 20. století. Je založena na zkreslování sinusového signálu při průchodu obvodem s nelineární charakteristikou. Nelineární charakteristiky systému bývají také označovány jako tvarovací funkce. Nelinearita se projevuje nejen při statickém vývoji signálu, ale také v případě dynamického přenosu. Například použitím kompresoru¹ dochází k nelineárnímu tvarování signálu, pokud vstupní signál překročí úroveň threshold, což je hodnota signálu, která nesmí být překročena. Pokud má vstupní signál vyšší hodnotu, dochází k srovnání úrovně na tuto nastavenou hodnotu a dochází tak ke zkreslení signálu viz obr. 1.3 [1].

¹ Kompresor – efekt pro úpravu dynamiky zvukového signálu zeslabující vstupní signál nad nastavenou prahovou úrovní (threshold) v nastaveném poměru komprese (ratio). Tímto dochází ke snížení dynamického rozsahu signálu.[23]



Obr. 1.4 Tvarová syntéza, převzato z [1]

Tvarování může modifikovat vstupní signál na základě jeho tvarovací funkce. Výsledné spektrum výstupního signálu tedy závisí na tvaru převodní charakteristiky. Je-li převodní charakteristikou přímka, jedná se o lineární obvod a na výstupu nevznikají žádné vyšší harmonické složky. Má-li převodní charakteristika tvar liché funkce, budou na výstupu vznikat liché harmonické složky, jež mají hudebně ostrý charakter a dodávají tak výslednému zvuku pronikavější barvu. Má-li naopak převodní charakteristika tvar sudé funkce, ve spektru výstupního signálu budou zastoupeny převážně sudé harmonické složky, které jsou z hudebního hlediska vzhledem k základnímu tónu čisté intervaly, to znamená, že spolu tyto frekvence ladí a zvuk takto tvarovaného signálu je pro lidské ucho z estetického hlediska velice příjemnou záležitostí. Typickým příkladem využití tohoto typu nelinearity je použití lampového zesilovače v kytarovém kombu. Pokud je složka nesymetrická, vznikají sudé i liché harmonické složky, jejich počet a poměr amplitud je dán tvarem převodní charakteristiky.

Pokud do přenosové funkce vstupuje více harmonických složek, vznikají další složky tzv. intermodulační produkty. Čím více složek vstupuje do systému, tím více intermodulačních produktů vzniká. Tento jev se nazývá intermodulace. Signál, v jehož spektru dochází při průchodu nelineárním obvodem k intermodulaci, má, co se týče barvy zvuku, velice podobný charakter jako frekvenční modulace, a to z důvodu přidání intermodulačních složek, které nejsou v harmonii se všemi frekvenčními složkami harmonického signálu. [1]

Vývoj těchto metod, spjatých převážně s digitálními technologiemi, byl a je dosud dán snahou dospět úplně jinou cestou ke konkrétní podobě tradičního i netradičního hudebního signálu. [28]

Podrobnější popis problematiky nelineárních obvodů je popsán v následující kapitole, kde je také technicky popsán proces nelineárního tvarování.

2 Problém nelineární charakteristiky

V minulé kapitole byly rozebrány dvě metody zvukové syntézy. Popsána byla syntéza zvukového signálu pomocí FM modulace a také zde byla uvedena metoda nelineárního tvarování signálu. Tato kapitola rozvíjí část o nelineárním tvarování signálu a popisuje technické řešení tohoto typu zvukové syntézy.

Má-li být s vlastnostmi nelineárních systémů operováno, je třeba na ně pohlížet analyticky. V analogových obvodech je nelinearita způsobena fyzikálními, chemickými nebo konstrukčními vlastnostmi jednotlivých prvků. Pro využití těchto vlastností je potřeba nahradit nelineární charakteristiku matematickým modelem popisujícím tyto vlastnosti analytickými výrazy, a to s přiměřenou přesností. V některých případech lze určit funkční model z fyzikálních zákonitostí. Tyto zákonitosti bývají zpravidla velmi složité, proto se nelineární charakteristika takových obvodů určuje experimentálně. Většinou měření potřebných závislostí. Tyto výsledky se zaznamenávají do grafu či tabulek jako uspořádané dvojice. Skutečnou charakteristiku systému lze tedy zapsat jako množinu diskrétních bodů. Nyní je zapotřebí k takové nelineární charakteristice najít vhodnou analytickou funkci, aby byla získána spojitá funkce vyjádřena funkcí vektorové proměnné:

$$y = f(x) \quad (3.1)$$

To znamená, že je nutné charakteristiku $f(x)$ aproximovat¹ funkcí $g(x)$, která se nazývá aproximační. [15][16]

Tuto aproximaci nelineární charakteristiky pomocí aproximační funkce je nutné provést ve dvou krocích:

- 1) Výběr vhodné aproximační funkce
- 2) Získání koeficientů této funkce.

2.1 Rozdělení aproximací

Pro praktická využití se využívá mnoha různých aproximačních funkcí. Důležitou součástí analýzy je vhodný výběr aproximační funkce. Ta by měla být volena tak, aby vystihovala danou charakteristiku s co nejvyšší přesností. Čím přesněji bude aproximační funkce danou charakteristiku vystihovat, tím budou přesnější i výsledky daného nelineárního systému. [15]

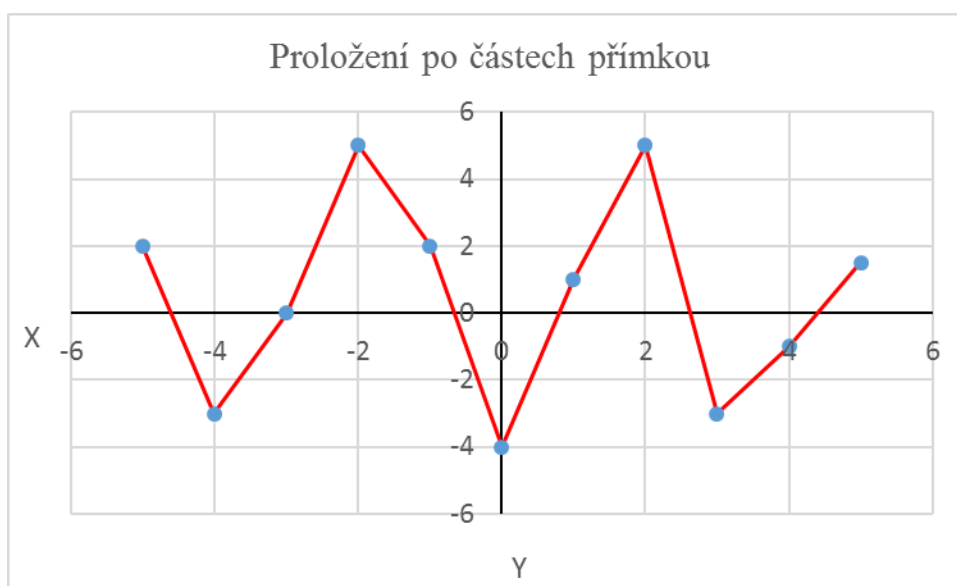
V následujících podkapitolách jsou uvedeny různé varianty aproximace převodní charakteristiky pomocí aproximační funkce.

¹ Při numerickém řešení úloh matematické analýzy často nahrazujeme danou funkci funkcí jinou, která v nějakém vhodném smyslu napodobuje danou funkci a snadno se přitom matematicky zpracovává či modeluje na počítači. Tuto funkci nazýváme aproximací dané funkce. [6]

2.1.1 Aproximace po částech přímkou

Aproximovanou funkci si lze představit jako lomenou čáru. Každé dva po sobě následující body jsou spojeny přímkou. Tato výsledná čára je tedy lineární kombinací funkcí f_1 až f_N , kde N je počet jednotlivých funkcí. [15] Nechť je zapsána rovnicí:

$$y = b_1 f_1(x) + b_2 f_2(x) + \dots + b_N f_N(x) = \sum_{n=1}^N b_n f_n(x) \quad (3.2)$$



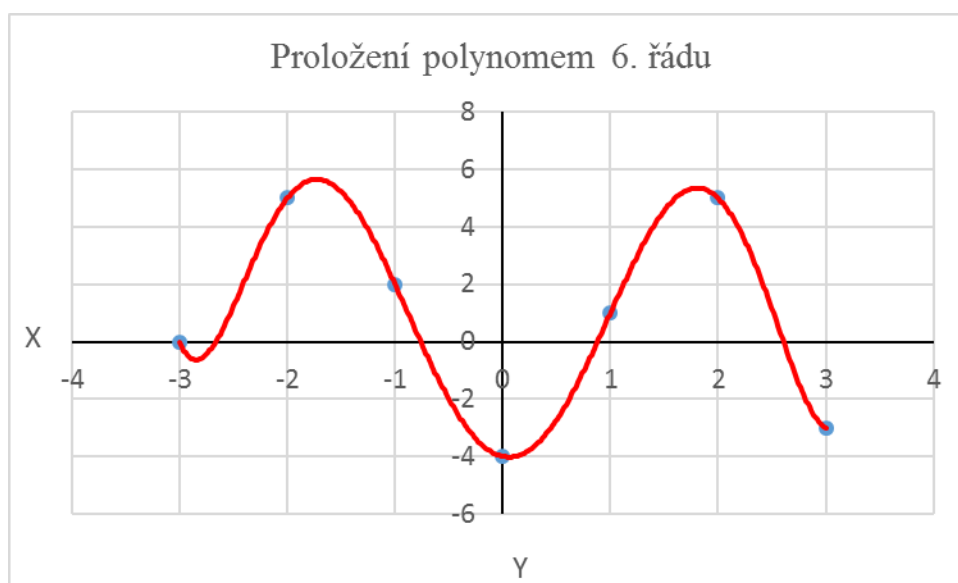
Obr. 2.1 Aproximace po částech přímkou

2.1.2 Aproximace polynomem

Pokud volíme za aproximační funkci rovnici ve tvaru mocninového polynomu, výsledná převodní charakteristika bude v následujícím tvaru:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Nx^N = a_0 + \sum_{n=1}^N a_nx^n \quad (3.3)$$

Tato aproximační funkce má konstantní koeficienty $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ závisející na průběhu charakteristiky. [15]

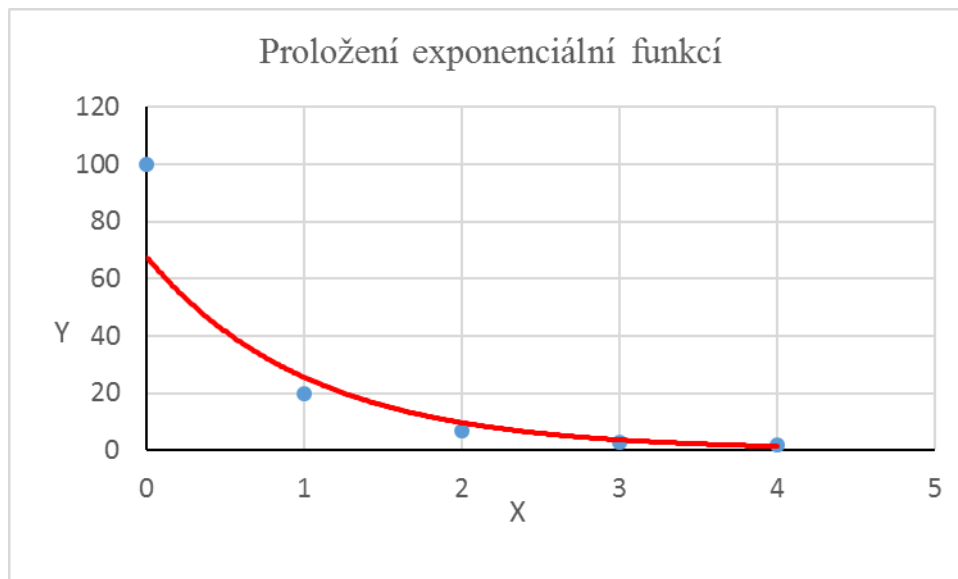


Obr. 2.2 Aproximace polynomem

2.1.3 Aproximace exponenciální funkcí

Za aproximovanou funkci je zvolena exponenciální funkce: [15]

$$y = a_0 + a_1 e^{xb_1} + a_2 e^{xb_2} + \dots + a_N e^{xb_N} = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n e^{xb_N} \quad (3.4)$$



Obr. 2.3 Proložení exponenciální funkcí

2.1.4 Další možnosti aproximace

Tři výše zmiňované aproximace jsou nejčastěji používané aproximace. Existují ale i další možnosti aproximace.

- 1) Trigonometrický polynom – aproximace pomocí Fourierovy řady
- 2) Racionální lomená funkce
- 3) Transcendentní funkce – aproximace pomocí různých funkcí jako jsou geometrické, cyklometrické, hyperbolické, hyperbolometrické atd. [15]

Po zhodnocení možností aproximace tvarovací funkce je třeba vybrat nejvhodnější metodu aproximace. V této bakalářské práci jsem využila metodu aproximace polynomem. A to konkrétně polynomem pátého řádu, jelikož tvar této funkce je ovlivňován šesti body lidského těla. Konkrétněji je o této záležitosti pojednáno v kapitole č. 5.

2.2 Určení koeficientů aproximační funkce

Pro výpočet koeficientů aproximačních funkcí lze využít hned několika metod. Nejvhodnější jsou tyto metody:

- 1) Interpolační metoda
- 2) Metoda nejmenších čtverců
- 3) Metoda rektifikace

Volba metody výpočtu koeficientů závisí především na použité aproximační funkci. K tomuto účelu byla v této bakalářské práci zvolena Interpolační metoda. Tuto metodu lze použít právě tehdy, když body, kterými je funkce aproximována, přímo leží na hledané funkci. Tento požadavek je tedy splněn a zmíněnou metodu lze použít. Tato metoda je zároveň nejpoužívanější metodou pro určení koeficientů.

Interpolační metody se dále dělí na konkrétní metody. Nejvhodnější interpolací je tzv. polynomická regrese. Jedná se o regresní model, který je lineární v parametrech, ale popisuje nelineární závislost mezi proměnnými. Aproximovaná funkce je zadána rovnicí:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Nx^N \quad (3.3)$$

Kde a_i jsou koeficienty, které mají být určeny a N je stupeň polynomu. [19]

Řešení polynomické regrese začíná stanovením stupně polynomu. Pro účel bakalářské práce použijeme polynom 5. stupně. Stupeň polynomu nemůže překročit hodnotu, která je dána počtem bodů určující danou křivku. Pokud tedy existuje funkce zadaná šesti body, můžeme ji aproximovat maximálně polynomem 5. stupně.

Máme-li naměřená data: (x_i, y_i) , pro $i = 1, \dots, m$, kde x_i představují body měření a y_i potom hodnoty naměřené v bodech x_i . Každému bodu x_i je přiřazena právě jedna hodnota y_i . Z těchto dat můžeme sestavit model, který je popsán rovnicí 3.3. Tento model zapíšeme v maticovém tvaru jako:

$$M(x_i, a) \approx y_i \quad (3.4)$$

a_0, \dots, a_N představují tzv. volný parametr, na kterém je tento model závislý, viz rovnice 3.3. [24]

Nyní je třeba provést optimalizaci teoretického modelu tak, aby co nejvíce odpovídal naměřeným datům. Toho je docíleno minimalizací součtu čtverců, která minimalizuje odchylku modelu od naměřených hodnot. [19][24]

Výše popsáný model je lineární vzhledem k hledaným parametrům a lze ho tedy zapsat takto:

$$M(x_i, a) = \phi_1(x_i) \cdot a_0 + \dots + \phi_N(x_i) \cdot a_N \approx y_i \quad (3.5)$$

Kde $i = 1, \dots, m$ a $N = 0, \dots$, řád polynomu. ϕ_1, \dots, ϕ_N představují lineární funkce. [24]

Pro odchylku modelu od reálného výsledku měření platí:

$$r_i(a) = M(x_i, a) - y_i = \phi_1(x_i) \cdot a_0 + \dots + \phi_N(x_i) \cdot a_N - y_i \quad (3.6)$$

Hledáme takový parametr a , pro nějž platí, že suma čtverců odchylek $r_i(a_i)$ je minimální:

$$\min_a \sum_{i=1}^m r_i(a)^2 \quad (3.7)$$

Tato lineární úloha nejmenších čtverců bude následně řešena řešením rovnice:

$$A^T A a = A^T y \quad (3.8)$$

K výpočtu této rovnice je v praktické aplikaci využito QR faktoralizace.

Pokud má matice $M \in R^{m \times n}$, kde $m \geq n$, hodnost n , pak pro ni mohou být vytvořeny matice R a Q tak, aby platilo:

$$M = Q \cdot R \quad (3.9)$$

Kde:

$R \in R^{m \times n}$ je horní trojúhelníková matice

$Q \in R^{m \times n}$ je ortogonální matice [24]

Algoritmus výpočtu je takový, že nejprve dojde k výpočtu matic Q a R , poté je třeba určit vektor d , množina čísel tohoto vektoru je poté rovna koeficientům a_N . [24]

$$\begin{aligned} A &= Q \cdot R \\ d &= Q^T \cdot y \\ Ra &= d \end{aligned} \quad (3.10)$$

Pokud tedy shrneme tuto obsáhlou podkapitolu, je zde uveden princip algoritmu, který je využit v softwarové aplikaci elektronického hudebního nástroje pro výpočet koeficientů převodní charakteristiky z pohybu lidského těla. Ve stručnosti lze algoritmus představit popisem uvedeným v následujícím odstavci.

Na původní charakteristice jsou dány body – původní data z diskrétní množiny dvojic bodů (body lidského těla) – počet těchto bodů musí být roven počtu koeficientů v analytickém výrazu. Poté jsou postupně dosazovány souřadnice zvolených bodů do aproximované funkce. Tímto krokem lze získat soustavu rovnic. Počet rovnic by měl být shodný s počtem koeficientů. Tyto rovnice pak tvoří jednotlivé koeficienty aproximované funkce. [15]

3 Vliv nelineární charakteristiky na vstupní signál

V předchozích kapitolách bylo vysvětleno, jakými způsoby může nelineární převodní charakteristika ovlivňovat průběh vstupního signálu. Dále byl pomocí aproximace polynomem a interpolace určen předpis funkce nelineární převodní charakteristiky. Jak tedy tato skutečnost ovlivní signál, který bude procházet tímto systémem?

Mějme tedy nelineární převodní charakteristiku zadanou obecnou rovnicí aproximační funkce:

$$y[n] = \sum_{k=1}^{\infty} a_k (x^k[n] - x_0) \quad (4.1)$$

Nyní přivedeme na vstup tohoto systému harmonický signál zadaný rovnicí:

$$x[n] = X \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_0\right) \quad (4.2)$$

Kde X je amplituda, N perioda diskrétního harmonického signálu a φ_0 počáteční fáze. Tuto rovnici dosadíme do rovnice převodní charakteristiky.

$$y[n] = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k \cos\left(k\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_0\right)\right) \quad (4.3)$$

$$\text{Pro sudé } R-k \quad Y_k = \sum_{m=1}^{(R-k)/2} \frac{(2m+k)!}{2^{2m+k-1} m! (m+k)!} a_{2m+k} X^{2m+k} \quad (4.4)$$

$$\text{Pro liché } R-k \quad Y_k = \sum_{m=1}^{(R-k-1)/2} \frac{(2m+k)!}{2^{2m+k-1} m! (m+k)!} a_{2m+k} X^{2m+k} \quad (4.5)$$

Kde Y_k představují amplitudy výstupního signálu. [22]

Ze složení odvozeného spektra výstupního signálu nelineárního systému, pokud je na jeho vstup přiveden harmonický signál, lze odvodit vlastnosti systému způsobené aproximací polynomem:

- 1) Aproximujeme-li funkci $f(x)$ nelineárního systému polynomem řádu R , bude platit $Y_k = 0$ pro $k > R$ a kmitočtový rozsah spektrálních složek výstupního signálu bude omezen. Pro kmitočet nejvyšší spektrální složky výstupního signálu $f_{2max} = R \cdot f_{1max}$, kde f_{1max} je maximální kmitočet vstupního signálu. [22]
- 2) Závislost amplitud harmonických složek na amplitudě vstupního signálu roste s řádem polynomu a pořadím harmonické složky. [22]

- 3) Velikost stejnosměrné složky a amplitud sudých harmonických složek jsou závislé pouze na koeficientech polynomu se sudým pořadím, naopak amplitudy lichých harmonických složek pouze na koeficientech polynomu s lichým pořadovým číslem. Amplitudu k -té harmonické složky ovlivňují pouze koeficienty polynomu a_k až a_R . [22]
- 4) Pokud nastane situace, že koeficienty aproximačního polynomu s lichým pořadím budou mít nulovou hodnotu, pak bude funkce aproximačního polynomu funkcí sudou a pokud budou nulové koeficienty aproximačního polynomu se sudým pořadím, bude funkce aproximačního polynomu lichá. [22]

Tímto způsobem by měla být ovlivněna barva výstupního zvukového signálu, který je generován experimentálním hudebním nástrojem.

4 Kinect XBOX ONE

Jak už bylo v úvodu řečeno, k provázání pohybu lidského těla a softwarové aplikace pro hudební nástroj je využito pohybového senzoru Kinect XBOX ONE s adaptérem pro PC. Tento revoluční přístroj je v dnešní době hojně rozšířený mezi nejširší veřejností. Jeho vlastností se využívá po celém světě ve všech disciplínách lidské působnosti. Proto je tento přístroj vhodný také k propojení pohybu lidského těla a elektronické hudby.

4.1 Specifikace

Mezi jeho vlastnosti patří rozeznání až 25 kloubů v lidském těle a jejich mapování. Minimální vzdálenost od senzoru, kdy je schopen zachytit lidský pohyb, je 0,5 metru. Přístroj je schopen mapovat pohyb až 5 metrů vzdálené osoby. K dalším jeho specifikacím patří rozlišení obrazu, které činí 1920 x 1080 pixelů (FULL HD), rychlost snímání 30 snímků za sekundu. Kinect obsahuje čtyři infračervené senzory různé vlnové délky a fázového posuvu. Rozlišení této infračervené kamery je 515 x 424 pixelů. [13]

K snímání pohybu dochází pomocí kombinace hlavní kamery a čtyř výše popsaných infračervených senzorů. K rozlišení hloubky obrazu využívá Kinect kameru typu Time of Flight. Na tomto principu je možné vytvořit dokonalou hloubkovou mapu a snímat tak pohyb kloubů uživatele ve všech třech souřadnicích, kdy souřadnice X popisuje horizontální polohu kloubu, souřadnice Y polohu vertikální a souřadnice Z určuje vzdálenost kloubu od kamery. Jako počátek souřadnicového systému je zde čočka kamery, proto je třeba před použitím zařízení nastavit do správné pozice. Je-li senzor umístěn příliš vysoko, nástroj nebude správně fungovat, protože poloha Y daných kloubů určuje parametry převodní charakteristiky virtuálního nelineárního obvodu pro harmonické zkreslování vstupního signálu. Dle testování elektronického hudebního nástroje je nejlepší umístit senzor Kinect přibližně do výšky těžiště uživatele. [13]



Obr. 4.1 Kinect XBOX ONE, převzato z [17]

4.2 Kinect a vývojové prostředí Visual Studio

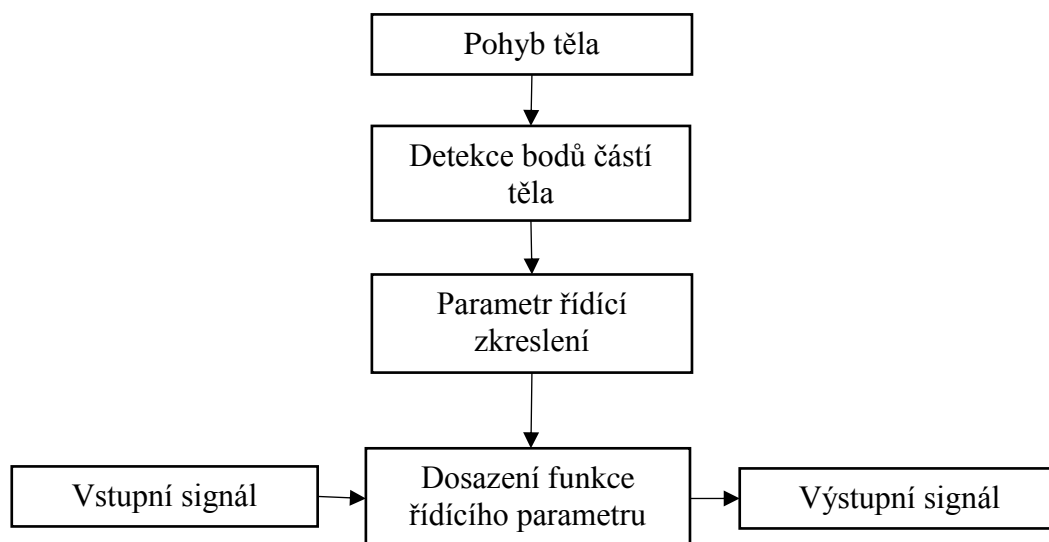
Aby bylo možné ovládat parametry zvukového signálu pomocí tohoto senzoru, je třeba vytvořit aplikaci, která převezme data snímaná senzorem Kinect a následně je zpracuje. K tomu je zapotřebí, aby byl Kinect kompatibilní s daným počítačem a vývojovým prostředím. Kinect XBOX ONE je převážně využíván jako interaktivní ovladač konzole XBOX. K vývoji aplikace je však potřeba připojit Kinect k PC. K tomu slouží speciální adaptér, který se k počítači připojí pomocí 3.0 USB portu. [12][13]

Kinect ale nelze připojit ke každému počítači. Připojené zařízení musí splňovat následující požadavky, aby mohlo být se senzorem Kinect propojeno. OS Windows 8 a vyšší, 64bitový procesor (x64), 4 GB RAM paměti a grafická karta s podporou DirectX 11.[12][13]

Aplikace pro Kinect je možné vyvíjet v prostředí Visual Studio. Microsoft na svých stránkách poskytuje vývojářům balíček Kinect SDK, po jeho instalaci je možné otevřít Kinect ve vývojovém prostředí a využít jeho potenciál k tvorbě nových aplikací. Kinect podporuje programovací jazyky C++/CLI, C# a Visual Basic .NET [12]

5 Softwarová aplikace hudebního nástroje

Tato obsáhlá kapitola pojednává o vývoji softwarové aplikace pro funkční elektroakustický nástroj ovládaný pohybem lidského těla. Jsou zde diskutovány možnosti, problémy a nedostatky, které nastaly při vývoji. V následujícím textu bude tedy popsán vývoj experimentálního softwarového elektroakustického hudebního nástroje, jehož princip je schematicky znázorněn v následujícím diagramu.



Obr. 5.2 Princip experimentálního elektroakustického softwarového hudebního nástroje

Pro softwarovou aplikaci experimentálního elektroakustického hudebního nástroje bylo využito programovacího jazyka C# a Windows Forms Aplikace ve vývojovém prostředí Visual Studio 2012. Nedílnou součástí tohoto projektu je použití knihovny NAudio, která obsahuje řadu užitečných tříd pro digitální zpracování zvukového signálu a práci se zvukovými soubory. Funkce této knihovny jsou přehledně vypsány v následující podkapitole. V dalších podkapitolách budou představeny jednotlivé třídy zdrojového kódu a popsána aplikace výše popsaných metod na poli digitálního zpracování akustického signálu v jazyce C#.

5.1 Knihovna NAudio

Při realizaci tohoto hudebního nástroje bylo využíváno této knihovny. Pokud nebyly třídy objektů, které jsou definovány v této knihovně použity přímo, tak byly alespoň předmětem inspirace pro vývoj nových tříd.

Knihovna NAudio je open source .NET audio a MIDI knihovna obsahující desítky tříd určených k urychlení vývoje aplikací, které pracují se zvukem v .NET Frameworku. Vývoj této velice praktické knihovny započal roku 2002 a dodnes se knihovna rozrůstá o řadu nových funkcí. [5]

Vlastnosti knihovny NAudio:

- 1) Přehrávání zvuku pomocí různých rozhraní API
 - WaveOut
 - DirectSound
 - ASIO
 - WASAPI (Windows Vista a vyšší)
- 2) Dekompresi různých audio formátů, vytvoření WAV souboru z tohoto dekomprimovaného audia:
 - Dekódování MP3 pomocí ACM nebo DMO kodek
 - AIFF
 - G.711 mu-law a a-law
 - ADPCM
 - G.722
 - Speex (Pomocí NSpeex)
 - Soubory SF2
- 3) Dekódování pomocí libovolného ACM kodeku nainstalovaného v počítači
- 4) Záznam zvuku pomocí WaveIn, WASAPI nebo ASIO
- 5) Číst a zapisovat standardní WAV soubory
- 6) Promíchání zvukových řetězců a manipulace s nimi pomocí 32 bitového směšovacího motoru s plovoucí desetinnou čárkou
- 7) Rozsáhlá podpora pro čtení a zápis MIDI souborů
- 8) Úplný model MIDI událostí
- 9) Základní podpora pro Windows Mixer API
- 10) Sbíрка užitečných Windows Forms Controls
- 11) Některé základní zvukové efekty, včetně kompresoru

Tato knihovna je volně dostupná ke stažení na oficiálních stránkách knihovny NAudio: <https://naudio.codeplex.com/>. Pokud tedy chceme pracovat se zvukovým signálem v .NET Frameworku, je tato knihovna ideálním řešením. [5]

5.2 Zpracování dat z pohybového senzoru Kinect

Programování senzoru Kinect ve Windows Forms je díky Kinect SDK velice intuitivní a jednoduché. Nejprve je třeba vytvořit metodu, díky které se aktivuje pohybový senzor a Kinect začne zaznamenávat polohu člověka před kamerou. Díky objektům Joint je možné snadno přistupovat k jednotlivým souřadnicím daného kloubu. Viz ukázka kódu:

```
IReadOnlyDictionary<JointType, Joint> joints = body.Joints;  
Dictionary<JointType, Point> jointPoints = new Dictionary<JointType, Point>();  
Joint rightHand = joints[JointType.HandRight];
```

Právě byla získána poloha pravé dlaně v prostoru pomocí senzoru Kinect a tato data mohou být předána jiné proměnné a následně mohou být zpracována.

```
yrh = rightHand.Position.Y;
```

Tímto způsobem byla hodnota souřadnice Y pravé dlaně uživatele předána do proměnné *yrh*.

```
modulation.Frequency1 = 55 * Math.Pow((yrh + 2), 2.75);
```

A takto je použita hodnota souřadnice k dosazení do vztahu pro výpočet frekvence generátoru. Generátor tedy v tento okamžik generuje signál o frekvenci dané uvedeným matematickým vztahem.

Takto lze operovat se všemi měřitelnými body a vytvářet tak nové závislosti zvukového signálu na pohybu lidského těla.

5.3 Generátor

Jako základní zdroj signálu tohoto experimentálního hudebního nástroje byl zvolen generátor harmonického signálu s možnou změnou výšky fundamentální frekvence. Tato změna je závislá na změně polohy pravé ruky uživatele ve vertikálním směru, jak už bylo zmíněno v podkapitole 5.2. Vztah mezi frekvencí generátoru a polohou pravé dlaně v prostoru byl experimentálně ověřen a nastaven tak, aby byla frekvence generátoru v rozumném rozsahu i v extrémních polohách uživatele. Nástroj tedy můžeme považovat za experimentální i z hlediska ladění.

V tomto generátoru však nevzniká pouze základní harmonický signál, ale také dvě postranní složky frekvenční modulace, kterou určíme následujícím způsobem:

```
double mf = (modulation.Frequency1 - xrh) / (2 * Math.PI * xrh);  
modulation.Frequency2 = modulation.Frequency1 + mf;  
modulation.Frequency3 = modulation.Frequency1 - mf;
```

Další parametr generátoru je amplituda daných složek, ta je závislá na vzdálenosti uživatele od senzoru. Pro základní frekvenci platí, že její amplitudu ovlivňuje vzdálenost střední části páteře v ose Z. Amplitudu modulačních frekvencí můžeme pozměnit změnou souřadnice Y pravé nebo levé nohy. Takto tedy vypadá komplexní signál, který je obsažen na výstupu tohoto generátoru.

5.4 Výpočet a aplikace nelineárního zkreslení

Tato podkapitola navazuje na předchozí popis generátoru zvukového signálu. Popisuje zde jednotlivé kroky digitálního zpracování vstupního zvukového signálu a uvádí také problémy, které nastaly při jejich realizaci.

5.4.1 Získání koeficientů tvarovací funkce

V tomto kroku přivedeme výstup z generátoru na vstup nelineárního tvarovacího obvodu. Tohoto je dosaženo pomocí třídy instance třídy SampleProvider, která načte vstupní data z generátoru Kinectu a dále je předává instanci třídy, která je zodpovědná za výpočet koeficientů pomocí polynomicke regrese. Pro výpočet regulární a horní trojúhelníkové matice je využito knihovny Math.Net, která obsahuje mnoho tříd pro nejrůznější matematické aplikace. Tyto třídy mohou být jednoduše použity při vývoji nových aplikací v .NET frameworku. Knihovna Math.Net obsahuje tedy i třídy pro výpočet zmiňovaných matic.

Při vývoji aplikace nastal v tomto bodě problém při předávání proměnných, které obsahovaly data získané z pohybu uživatele, proměnným v metodě pro výpočet polynomicke regrese. Proměnné získané z Kinectu jsou číselným typem s pohyblivou desetinnou čárkou float, kdežto proměnné v metodě polynomicke regrese vyžadují číselný typ double. Proto vždy, když došlo k předání dat této funkci, veškeré údaje byly zaokrouhleny na dvě desetinná místa, což zapříčinilo to, že na výstupu byl nulový signál. Tento problém byl vyřešen změnou polynomicke regrese tím způsobem, aby mohla pracovat s proměnnými typu float. V původním kódu bylo operováno s mocninou vstupních veličin, proto byl vyžadován typ double. Proto bylo třeba danou mocninu rozepsat na jednotlivé součiny dané veličiny. Poté proběhl algoritmus výpočtu koeficientů tvarovací funkce bez problému a získaná data mohla být využita v dalším kroku.

5.4.2 Algoritmus rychlé Fourierovy transformace

Jsou-li známy koeficienty tvarovací funkce, může být tato funkce aplikována na signál z generátoru. K tomuto kroku je zapotřebí převést signál z časové oblasti do oblasti frekvenční a získat tak diskrétní Fourierovu řadu, na kterou je možné aplikovat dané zkreslení.

Tento algoritmus provede rozdělení spektra signálu na N částí, přičemž velikost šířky pásma tohoto spektra je daná zvolenou vzorkovací frekvencí. Je-li vzorkovací frekvence 44 100 Hz, šířka pásma přenášeného signálu bude mít právě tuto hodnotu. Tuto hodnotu podělíme číslem N , které udává délku Fourierovy transformace – neboli počet částí, na které se má spektrum rozdělit. Pro dosažení ideálních výsledků volíme čísla, která jsou přirozenou mocninou čísla 2. Takto dostaneme N vzorků signálu. Frekvence jednotlivých vzorků je vždy rovna:

$$f_k = \frac{f_{vz}}{N} \cdot k \quad (5.1)$$

Kde f_k je frekvence k -tého vzorku, f_{vz} je vzorkovací frekvence a k je pořadí daného vzorku.

Pokud je vstupní signál rozdělen na k vzorků, můžeme pro jednotlivé vzorky signálu aplikovat efekt harmonického zkreslení, a to tak, že ke každému vzorku spektra, jenž je násoben koeficientem tvarovací funkce a_0 , přičteme vzorek, jehož pozice ve spektru je $2k$, a vynásobíme ho koeficientem a_1 . Takto budeme ke k -tému vzorku přidávat další frekvence, jejichž frekvence bude vždy celočíselný násobek frekvence k -tého vzorku. Počet takto přidaných frekvencí je dán počtem koeficientů tvarovací funkce, v tomto případě bude tedy k základnímu kmitočtu k -tého vzorku přidáno dalších pět harmonických frekvencí. Viz kapitola č. 3 rovnice 4.3, 4.4, 4.5.

5.4.3 Výstupní signál

Mějme tedy data z Kinectu a vstupní data předaná instancí třídy pro výpočet FFT a polynomicke regrese. Nejprve nastane výpočet koeficientů polynomu, a poté začne probíhat algoritmus pro výpočet FFT. Právě v tento okamžik dojde k přidání vyšších harmonických složek do spektra původního signálu. Signál je pak zpětně převeden do časové oblasti ještě před výstupem, je na něj aplikován limiter, který omezí signály s absolutní hodnotou vyšší než 1. Takto zkreslený signál se tedy dostává na výstup systému.

Zde bude diskutován další problém, který nastal při tvorbě nelineárního zkreslení. Byl zapříčiněn použitím špatného typu rozhraní API pro přehrávání výsledného signálu. Původně byl použit typ WaveOut, který lze bez problému použít, pokud v aplikaci nepoužijeme jiný výpočetně náročný algoritmus, jako je FFT nebo také polynomicke regrese. Při použití WaveOut nedochází k tzv. vytvoření workerthreadu, který umožňuje to, že tento proces výpočetního algoritmu běží na pozadí hlavního procesu, za který jsou ve Windows Forms aplikacích považovány události odehrávající se v uživatelském rozhraní. Pokud tedy nedojde k vytvoření workerthreadu, hlavní aplikace bude vždy čekat, než proběhnou tyto náročné operace a aplikace se zastaví, až po proběhnutí této akce se přehraje příslušný vzorek z bufferu výstupního signálu.

Řešením tohoto problému je místo WaveOut použití typu rozhraní API WaveOutEvent. Toto rozhraní vytvoří automaticky workerthread pro všechny operace probíhající zároveň při přehrávání signálu. Z toho vyplývá, že právě při použití tohoto typu API může být zvuk přehráván a zároveň bude probíhat výpočet FFT a dalších algoritmů.

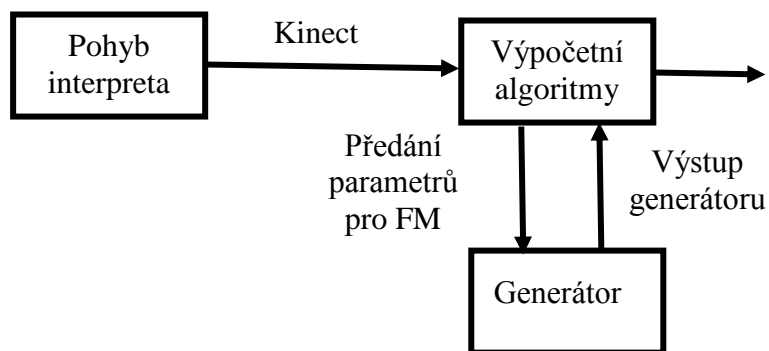
6 Popis hudebního nástroje

Tato podkapitola popisuje základní schéma nástroje a způsob hry na tento experimentální hudební nástroj. Kompletní kód softwarové aplikace, který je popsán v předchozí kapitole, je uveden na přiloženém DVD. Z důvodu rozsahu není kód uveden v tištěné verzi.

Tento experimentální hudební nástroj se skládá z těchto základních bloků:

- 1) Generátor harmonického signálu a modulovaného signálu
- 2) Výpočetní algoritmy pro převod pohybu na řídicí funkce
- 3) Řídicí obvod – pohyb interpreta zaznamenaný senzorem Kinect

Jednotlivé bloky a jejich části byly rozebrány v předchozí kapitole do detailu.



Obr. 6.1 Schéma experimentálního elektroakustického softwarového hudebního nástroje

Po spuštění programu začne generátor vytvářet harmonický signál. Frekvenci tohoto signálu může uživatel ovládat pohybem pravé dlaně ve vertikálním směru. Pokud uživatel pohne rukou směrem nahoru, frekvence generátoru se zvýší. Pohybem této dlaně uživatel také koriguje frekvenci modulačního signálu, a to pohybem v horizontálním směru. Pokud se uživatel hýbe směrem od střední osy kamery, mění tak frekvenci myšleného LFO signálu a přidává do výsledného spektra první dvojici frekvencí postranního pásma, jejichž frekvence je ovlivněna změnou frekvence LFO.

Nelineární zkreslení je řízeno myšlenou spojnicí bodů pravého kotníku, pravého kolene, a pravé strany kyčelního kloubu, levého ramene, levého lokte a levé dlaně. Pro praktičnost výpočtu byly souřadnice ve směru horizontálním nastaveny na neměnné v intervalu $(-1,1)$ a interpret tak mění pouze jejich souřadnice ve vertikálním směru. Vzájemnou změnou polohy těchto bodů dochází k přepočítání nelineární převodní charakteristiky, a tak změně nelineárního zkreslení signálu.

Uživatel je také schopen redukovat hlasitost tohoto nástroje, a to změnou vzdálenosti od kamery. Čím je interpret dále, tím je hlasitost signálu menší.

7 Srovnání hudebního nástroje s jinými podobně řízenými hudebními nástroji

V poslední kapitole této bakalářské práce budou uvedeny příklady jiných softwarových hudebních nástrojů, které taktéž využívají prostředky virtuální reality k tvorbě hudebního signálu pomocí pohybů lidského těla. Tato poslední kapitola porovnává hudební nástroj vytvořený v rámci této bakalářské práce s těmito dalšími nástroji.

První část tohoto pojednání je zaměřena na nástroje využívající stejný způsob snímání pohybu lidského těla, který je popsán a využit pro realizaci experimentálního hudebního nástroje v této bakalářské práci. Jedná se tedy o nástroje využívající pohybový senzor Kinect. Bude zde rozebrán rozdíl v přístupu k hudebním datům realizovaného hudebního nástroje a jiných nástrojů využívající k tvorbě umělého zvuku senzor Kinect.

Druhá část této kapitoly poukáže na další možnosti snímání pohybu lidského těla a následné přetvoření těchto pohybů na zvukový signál nebo jeho parametry. Stručně popíše snímání pohybu lidského těla pomocí různých druhů snímačů a pohybových čidel. Jsou zde uvedeny dva příklady právě pro porovnání se snímáním pomocí technologie Kinect.

7.1 Příklady nástrojů využívající senzor Kinect

V této podkapitole budou jednotlivě různé elektronické hudební nástroje využívající senzor Kinect k snímání pohybu lidského těla. Také zde proběhne srovnání těchto nástrojů s nástrojem realizovaným v této bakalářské práci.

7.1.1 Gestural Control of Modular Synthesis

Tento hudební nástroj navržený vývojáři z Pellegrini Music Lab¹ je spíše kontrolerem, který je schopen díky gestikulaci ruky ovládat softwarovou verzi modulárního syntetizéru Moog. Tento nástroj je aktivní pouze v případě, je-li zaznamenán pohyb ruky uživatele ve vymezeném poli. Pokud se uživatelova ruka nachází mimo tento prostor, na výstup přichází nezměněný zvuk původního vstupního signálu. [27]

Senzor Kinect mapuje pohyb ruky uživatele a softwaru poté předává souřadnice uživatelské ruky a její částí v osách X a Y. Tyto údaje jsou převedeny na MIDI signály, které generují dvě nezávislé řídicí napětí (VCO), dochází tedy k dvourozměrnému morfování těchto signálů. Tento proces je poté zpracován modulárním syntetizérem Moog. [27]

Nejedná se tedy o úplný hudební nástroj jako v případě nástroje navrženého v této bakalářské práci. Jedná se tedy jen o virtuální ovladač jiného softwaru, který zpracovává vstupní data. Také na rozdíl od realizovaného hudebního nástroje využívá protokol MIDI. Dalším rozdílem mezi těmito dvěma nástroji je způsob ovládání. Tento nástroj je ovládán pouze pohybem jedné ruky, nebere tedy uživatele jako celek, nýbrž uživatel pouze místo ovládání parametrů syntézy pomocí klávesnice, dotykového

¹ Pellegrini Music Lab je laboratoř a kvalitně vybavené nahrávací studio zabývající se problematikou elektronické hudby. Toto studio se může pochlubit výjimečnou sbírkou elektronických hudebních nástrojů. [2]

displaye nebo myši ovládá nástroj pohybem ruky ve vzduchu. Není zde tedy využito tolik možností Kinectu jako v případě nástroje, který je obsahem této bakalářské práce.

7.1.2 Kinectar

Kinectar je software vyvinutý australským multimedialistou Chrisem Vikem. Jeho základní myšlenka tkví v tom, že převádí souřadnice částí lidského těla na MIDI¹ data podobně, jako tomu bylo u předchozího hudebního nástroje. Tento nástroj je však mnohem propracovanější. A poskytuje bohaté možnosti, co se týče tvorby elektronické hudby.

Uživatel si zde může zvolit parametry, které bude svým pohybem ovládat, například LFO, reverb, atd. Uživatel tedy může ovládat míru vybraného efektu pomocí svého pohybu. [25]

Dalším parametrem, který může být ovládán tímto hudebním nástrojem je spouštění sampleů, možnost měnit výšku, délku a hlasitost daného sample. [25]

Aby byl tento software plně funkční, je třeba ho použít v kombinaci s programem Ableton Live nebo některým podobným softwarem. V tomto softwaru si uživatel nastaví všechna potřebná vstupní data. Provede zde např. výběr sampleů, efektů, ekvalizéru, atp. [25]

Tento hudební nástroj je tedy zcela komplexní a v kombinaci s dalšími MIDI kontrolery jako jsou např. nejružnější pedal boardy, může vytvářet zvukově velice zajímavé mixtury.



Obr. 7.1 Uživatelské rozhraní programu Kinectar, převzato z [25]

Ve srovnání s realizovaným hudebním nástrojem poskytuje Kinectar mnohem větší možnosti, co se tvorby zvuku týče. Kinectar však ovládá vždy jednou částí těla nějaký parametr, za to realizovaný hudební nástroj dokáže spojit jednotlivé části lidského těla v jednu funkci, která mění charakter výsledného zvuku. Lidské tělo tedy

¹ MIDI - Musical Instrument Digital Interface – průmyslový standardní technický hudební protokol, který propojuje zařízení různých výrobců včetně digitálních hudebních nástrojů, počítačů, tabletů atd.[18]

u realizovaného hudebního nástroje představuje přímo obvod, kterým vstupní signál z generátoru prochází. Kdežto Kinectar mnohem vystihuje status MIDI kontroleru.

Na podobném principu vzniklo více programů, Kinectar je však jeden z nejpropracovanějších. Podobným nástrojem je software Rosse Flighta, který se stejně jako Chris Vik věnuje multimediální tvorbě. Ten také vyvíjí vlastní software převádějící lidský pohyb na MIDI data. Jeho verze pohybového MIDI kontroleru je použitelná s programy Ableton Live i MAX.[8]

7.1.3 3D Shere Virtual Istrument

Tento hudební nástroj představuje spojení tance a hudby prostřednictvím senzoru Kinect s využitím MIDI protokolu. Program vykresluje sféru ve 3D prostoru pomocí OpenGL a uživatel může tancovat v této virtuální sféře. Uživatel vytváří události, umístěním rukou nebo chodidel do určitého místa a tyto události pak vytváření hudbu nebo akord.[16]

Ovládání tohoto nástroje nespočívá v přímém předání souřadnice hudebnímu parametru, ale používá souřadnic dvou snímaných bodů lidského těla, z těchto bodů určuje vektor a následně vypočítává úhel mezi dvěma vektory. Celkem aplikace vypočítává čtrnáct vektorů z bodů lidského těla snímaných kamerou Kinect. Mezi každými sousedními vektory vypočítává pak úhel. [16]

Co se týče ovládání tohoto nástroje uživatelem, jedná se o kombinaci bloků, kde každý blok představuje jednu notu nebo akord. Uživatel poté pohyby ruky vytváří hudbu. Program rozlišuje dvě úrovně tvorby hudby. V první úrovni tvorby hudby uživatel vytváří akordy a řadí je do sekvence, tuto sekvenci potom může přehrávat ve smyčce a svými pohyby je dále modifikovat. V druhé úrovni má uživatel možnost zadávat průběh noty po notě, respektive akord po akordu v reálném čase. [16]

Události probíhají tak, že program nejprve určí pozici rukou a určí vektor této spojnice, poté spočítá vzdálenost mezi tímto vektorem, který je určen pozicí pravé a levé ruky a středem virtuální sféry, která byla zmíněna v úvodu této podkapitoly. Tato sféra má střed svých souřadnic (x, y, z) v bodě (0, 0, 2) 3D prostoru. Její poloměr činí 0,6 m. V dalším kroku je vypočítán úhel mezi pravou a levou rukou uvnitř sféry. Jelikož sféra je definována sférickými souřadnicemi¹, tento úhel je počítán jako azimut². [16]

Pokud se tedy uživatel nachází uvnitř této sféry, program bude generovat tón nebo akord; výška tónu daného bloku je poté dána úhlem mezi pravou a levou rukou.

Takto byl ve zkratce popsán princip tohoto hudebního nástroje. Ve srovnání s ostatními zmíněnými hudebními nástroji již vytváří model tělesa, které vytváří vlastní zvuky, kdežto předchozí nástroje byly spíše jen kontrolery potřebující ke svému fungování další software, ve kterém dochází k digitálnímu zpracování signálu. Ve srovnání s navrhovaným nástrojem používá tento hudební nástroj zcela odlišný typ vytváření zvuku. Tento nástroj pracuje s protokolem MIDI, který ovládá výšku tónu, kdežto realizovaný nástroj přímo ovládá frekvenci generátoru dle pohybu interpreta. Dále se tyto nástroje liší v přístupu ke vstupním datům. Popsaný nástroj vypočítává úhly

¹ Bod sférických souřadnic je určen vzdáleností od počátku tohoto souřadného systému a úhlem, který svírá průmět bodu do roviny [x,y] s osou x a úhlem odklonu od osy z.[4]

² Azimut je v polárních souřadnicích chápán jako horizontální odchylka, měřená v záporném směru, od směru standardního.[7]

mezi jednotlivými částmi lidského těla, kdežto realizovaný nástroj operuje se získanými souřadnicemi přímo.

7.2 Příklady nástrojů využívající jiné prostředky virtuální reality k propojení hudby a pohybu lidského těla

V předchozích odstavcích byly vybrány některé hudební nástroje realizované pomocí senzoru Kinect.

Nyní budou stručně uvedeny nástroje využívající jiné způsoby získávání dat z pohybu interpreta, než je snímání pomocí senzoru Kinect. Ve srovnání s technologií pohybového senzoru Kinect mají tyto ostatní nástroje tu nevýhodu, že uživatel musí mít na svém těle umístěno čidlo nebo soustavu snímačů, které jeho pohyb zaznamenávají. Na druhou stranu zde není omezení zorného pole kamery Kinectu.

7.2.1 Hudební rukavice

Jedním velice zajímavým způsobem tvorby umělého zvuku pomocí pohybu lidského těla je použití tzv. hudebních rukavic. Tento hudební nástroj se skládá ze speciálních rukavic, které si uživatel nasadí na ruce. V těchto rukavicích jsou zabudované elektronické senzory. Součástí tohoto nástroje je také software detekující gesta vytvářená pohyby ruky, prstů a zápěstí interpreta. Software kromě gest mapuje také polohu interpretovy ruky.



Obr. 7.2 Hudební rukavice, převzato z [31]

Základním senzorem rukavice je senzor zaznamenávající otáčení zápěstí uživatele. Tento senzor využívá IMU¹ jednotku, která je také součástí rukavic a nachází se právě nad zápěstím uživatele. Toto čidlo tedy umožňuje uživateli ovládat zvukové parametry pomocí otáčení zápěstí nebo pohybem ruky v horizontálním i vertikálním směru. [31]

Pár rukavic dále využívá k přesné detekci gest interpreta 8 senzorů, tyto senzory mapují konkrétně ohyb prstů interpreta. Každá rukavice tedy obsahuje 4 senzory a každý tento senzor zaznamenává pohyb daného prstu. Na palci se senzor nenachází. Senzory jsou rafinovaně umístěny na prvních a druhých článcích prstů interpreta. Uživatel tedy může při použití těchto rukavic hrát rukama na nějaký hudební nástroj, aniž by mu senzory překážely při hře. [31]

Jako další kontrolní prvek obsahují rukavice tlačítka, která zjednodušují ovládání tohoto zařízení. Umožňuje např. spouštění efektů a snímání otáčení.

Každá rukavice má také zabudované RGB LED diody, které mohou být uživatelem naprogramovány tak, aby informovaly uživatele o změně softwaru nebo tak, aby uživatel mohl provádět změny prostřednictvím změny barvy diody. [31]

K zajištění hmatové zpětné vazby jsou zde zavedeny vibrační motory, které lze programovat přímo v softwaru, který je součástí těchto rukavic. [31]

Software zaznamenává údaje z jednotlivých senzorů a převádí data do MIDI nebo OSC² zpráv. Tohoto může být využito v jiném softwaru jako je například Ableton Live nebo Logic Pro X. Software komunikuje s čidly pomocí WiFi připojení. Vše tedy probíhá bezdrátově. [31]

Rukavice umí detailně zaznamenávat pohyby rukou interpreta. Nezaznamenávají však pohyby celého lidského těla a uživatel je musí mít při ovládání zvukových parametrů nasazený. Což z vizuálního hlediska lehce kazí dojem ovládání zvuku pouze pohybem lidského těla.

Rukavice se dají velice snadno použít například při živém vokálním vystoupení, kdy zpěvák chce používat nejrůznější efekty, pak tedy může výstup z mikrofону odbočit do efektové jednotky softwaru a zpěvák poté může korigovat nejrůznější parametry svého vlastního hlasu v reálném čase.

7.2.2 Sound on Intuition

Tento hudební nástroj byl vyvinut designerem Pieterem-Janem Pietersenem. Je složen z pěti různých zařízení, která jsou schopna generovat zvuk z pohybu různých částí lidského těla nebo jeho specifických vlastností. [33]

První blok nástroje je ovlivňován pohybem ruky uživatele. Výsledný hudební efekt je velice podobný Thereminu³. Je zde obsažen dálkový senzor, který dokáže změřit vzdálenost uživatelské ruky. V závislosti na vzdálenosti ruky od senzoru dochází k frekvenční modulaci vstupního signálu. [33]

¹ IMU - Inertial Measurement Unit – zařízení obsahující akcelerometry a gyroskopy. Pokud je toto zařízení spárováno s magnetometry, je schopno toto zařízení zaznamenávat výsledné magnetické pole a úhlovou rychlost. [32]

² OSC – Open Sound Control – protokol pro komunikaci mezi počítačem, syntezátorem a dalšími multimediálními zařízeními. Je optimalizován pro moderní technologie v oblasti počítačových sítí. [10]

³ Theremin – elektronický hudební nástroj. Byl vynalezen r. 1919 ruským fyzikem Leonem Thereminem. Nástroj se skládá ze dvou antén, jedna ovládá výšku výsledného tónu, druhá hlasitost. Toto je ovládáno v závislosti na vzdálenosti ruky interpreta od dané antény. [11]

Dalším prvkem, a to velice zajímavým, je senzor, který snímá interpretův srdeční tep a převádí údery lidského srdce na zvuk. Na základě srdečního rytmu uživatele dochází potom také k časové synchronizaci signálu. Tempo výsledné elektroakustické skladby je tedy udáno srdečním tepem interpreta. [33]

Uživatel může hudbu vytvářet také pomocí pohybu, resp. ohybu prstu. Toto je možné díky piezoelektrickému snímači¹, který je umístěn ve speciálním náprstku, který si uživatel musí nejprve navléknut na prst. Ohybem prstu se poté piezoelektrický snímač napíná a dochází ke změně výstupního signálu.

Piezoelektrický snímač je využit také v případě snímání pohybu noh interpreta. Není však zaznamenáván kontinuální pohyb, ale pouze údery nohou. Uživatel tedy může tuto část hudebního nástroje využít jako rytmické obohacení celkového výstupního zvuku, jehož tempo je udáno srdečním tepem interpreta. [33]

Poslední částí tohoto nástroje je scanner. Ten už nesouvisí pouze s pohybem interpreta. Pokud je nakreslena nějaká křivka nebo obrazec a uživatel pohybem své ruky naskenuje danou kresbu scannerem, je tato kresba převedena na hudební signál. [33]

Tento hudební nástroj je tedy ovládán pohybem lidského těla. Není ve všech hledech závislý na poloze jednotlivých částí těla interpreta, jak je tomu u realizovaného nástroje. Jsou zde ale zahrnuty jiné aspekty propojení hudby a lidského těla, jako je mapování srdečního tepu uživatele.

Toto byly dva příklady snímání pohybu lidského a následné transformování těchto parametrů ve zvukový signál jiným způsobem než s využitím senzoru Kinect, jak je popsáno v této bakalářské práci. Nástrojů využívajících technologie nejrozličnějších snímačů existuje však mnoho. Nebudou zde ale všechny podrobně popsány, protože využívají často stejné technologie a principy jako Sound on Intuition nebo hudební rukavice.

¹ Ke konstrukci tohoto typu snímače se využívá piezoelektrického jevu, ten spočívá v tom, že uvnitř některých polykrytalických dielektrik vzniká vlivem mechanické deformace elektrická polarizace, což způsobí to, že se na povrchu vytvářejí zdánlivé náboje, které mohou na přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat náboje skutečné. Jakmile napětí zmizí, dostává se dielektrikum do původního stavu. [30]

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zrealizovat originální elektronický hudební nástroj, který je založen na principu časově proměnlivého nelineárního tvarování, jak bylo navrženo v semestrálním projektu.

Jeho velkou předností je především netradiční ovládání nástroje nekontaktním pohybem vlastního těla, které je zrealizováno softwarovou cestou za pomoci pohybového senzoru Kinect. Tento senzor je v dnešní době velice populárním prostředkem pro realizaci různých interaktivních aplikací. A protože není hudebník fyzicky vázán na nějaký hudební nástroj nebo počítač, dává tato možnost tvorby elektronické hudby hudebníkovi velkou svobodu při interpretaci skladby. Hudebník se tedy může projevovat i tancem, pantomimou či dalšími uměleckými disciplínami přímo při hře na tento nástroj.

Při využívání tohoto experimentálního hudebního nástroje není nezbytně nutná znalost tradičního notového zápisu, protože místo přesně intonovaných tónů je cílem hry vytvářet spíše různě zkreslené zvuky v odlišných výškových polohách. Tím, že nástroj reaguje na změnu polohy uživatelské dlaně v reálném čase, má výsledný zvuk charakter glissanda.

Výsledná barva výstupního signálu je dána fundamentálním tónem sinusového průběhu, jenž je výstupem generátoru, modulovaným signálem, který je výsledkem pohybu pravé ruky interpreta v ose X, a vyššími harmonickými složkami, které vznikají nelineárním tvarováním fundamentálního tónu i modulovaného signálu. Charakter tohoto harmonického zkreslení závisí na vzájemné poloze určených bodů lidského těla. Ze souřadnic těchto bodů se poté vypočítává tvarovací funkce. A dle jejího průběhu se také mění zastoupení jednotlivých harmonických složek ve výstupním zvukovém signálu.

V porovnání s jinými hudebními nástroji založenými na ovládání pomocí senzoru Kinect je nástroj unikátní v tom, že nepoužívá MIDI rozhraní, ale je schopen přímo generovat signál. Nástroj sice využívá tradičních způsobů zvukové syntézy, ale způsob realizace syntézy je zcela netradiční díky bezkontaktnímu ovládání pomocí těla interpreta. Navíc se u tvarovací syntézy ovládá přímo tvarovací funkce (tzn. přímo základ tvorby zvuku) a ne běžnější parametry modulace, jako např. frekvence, míra a tvar, LFO, odřezávací frekvence filtru atd.

Toto řešení samozřejmě nabízí další možnosti vývoje tohoto hudebního nástroje, například přidání sofistikovaného spínacího systému. V oblasti digitálního zpracování signálu také přidání nejrůznějších filtrů a ekvalizéru nebo efektů měnící obálku ADSR, možnost granulární syntézy, nebo mapování nejrůznějších samplů v prostoru a následné spouštění těchto samplů interpretem.

Zdroje

- [1] A2B31SMS: Nelineární a tvarovací systémy. In: *SAMI: Signal analysis, Modelling and Interpretation* [online]. Praha, Dostupné z: <http://sami.fel.cvut.cz/sms/SMS10.pdf>
- [2] About. Pellegrini Music Lab [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.pellegriniusa.com/about.html>
- [3] ABRAHÁM, Stanislav, David DOUBEK, Michal CÁB a Bob OSTERTAG. Manuál pro uživatele elektronické hudby. *AV Slabikář* [online]. 2009, , 47 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://media.rozhlas.cz/_binary/02277661.pdf
- [4] Analýza: Souřadnice. Matematika.cuni.cz: Portál pro vysokoškolskou matematiku [online]. 2011 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://matematika.cuni.cz/dl/analyza/animace/k0033/souradnice/home.html>
- [5] *Codeplex: NAudio* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://naudio.codeplex.com/>
- [6] DANĚK, Josef. Aproximace funkcí. In: CAM: Centrum aplikované matematiky [online]. Praha, 2003 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: http://www.cam.zcu.cz/~danek/Students/2003_ZS/Materialy/aproximace_funkci.pdf
- [7] Dictionary: Azimuthal+Angle. The Free Dictionary: By Farlex [online]. Farlex, 2003 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.thefreedictionary.com/Azimuthal+angle>
- [8] FLIGHT, Ross. Kinect Body Instruments - Lecture Demonstration At Point Blank Studios. In: *Ross Flight Sound* [online]. London, 2016 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.rossflight.com/blog/2016/8/16/kinect-body-instruments-lecture-demonstration-at-point-blank-studios>
- [9] Frekvenční modulace. *Encyklopedie Fyziky* [online]. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1390-frekvencni-modulace>
- [10] Introduction to OSC. Opensoundcontrol.org: an Enabling Encoding for Media Applications [online]. 2010 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://opensoundcontrol.org/>
- [11] JEASON. What's a Theremin? In: Theremin World [online]. 2005 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://www.thereminworld.com/Article/14232/what-s-a-theremin->

- [12] Kinect for Windows SDK Beta. Microsoft: Research [online]. 2011 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/kinect-for-windows-sdk-beta/?from=http%3A%2F%2Fresearch.microsoft.com%2Fen-us%2Fum%2Fredmond%2Fprojects%2Fkinectsdk%2Fabout.aspx>
- [13] Kinect hardware. Microsoft: Developer Technologies [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect/hardware>
- [14] KOTEK, Zdeněk a Stanislav KUBÍK. *Nelineární obvody*. 1. Praha: SNTL, 1962. ISBN 04-517-62.
- [15] KOURIL, František a Kamil VRBA. *Teorie nelineárních a parametrických obvodů*. 1. Praha: SNTL/ALFA, 1981. ISBN 04-520-81
- [16] LU, Ming-Fong, Jen-Shiun CHIANG, Timothy K. SHIH a Shulei WU. 3D sphere virtual instrument with Kinect and MIDI. In: *2015 8th International Conference on Ubi-Media Computing (UMEDIA)*. IEEE, 2015, s. 140-145. DOI: 10.1109/UMEDIA.2015.7297444. ISBN 978-1-4673-8270-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7297444/>
- [17] In: Microsoft: Coordinate Mapping [online]. [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <https://i-msdn.sec.s-mst.com/dynimg/IC757720.png>
- [18] *MIDI Association* [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <https://www.midi.org/>
- [19] MILDE, David. Polynomická regrese. In: *Katedra analytické chemie - UP v Olomouci: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci | 17. listopadu 12 / Olomouc* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2011 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/13-pokrocilaregrese-2011-1320420430.pdf>
- [20] Modulace signálu se střídavým průběhem. *Encyklopedie Fyziky* [online]. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1388-modulace-signalu-se-stridavym-prubehem>
- [21] *Old-School Electronic Music* [online]. 2009. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/>
- [22] SCHIMMEL, Jiří. *SYNTEZA ZVUKOVÝCH EFEKTŮ S VYUŽITÍM NELINEÁRNÍHO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ* [online]. Brno, 2006 [cit. 2016-12-9]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3289-6.pdf>

- [23] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika* [online]. Druhé. Technická 12, 616 00 Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Elektroniky a Komunikačních Technologí, Ústav Telekomunikací, 2015, 197 s. [cit. 2017-06-01]. ISBN 978-80-214-4452-2.
- [24] Slide: 3978393. *Slideplayer.cz: Publikujte prezentace online* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3978393>
- [25] Software: Kinectar. *Ethno Tekh* [online]. Melbourne [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.ethnotekh.com/software/kinectar/>
- [26] SOSNA, Tomáš. *Digitální syntéza výstražných zvukových signálů* [online]. Praha, 2007 Dostupné z: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/9/94/Bp_2007_sosna_tomas.pdf
- [27] SYNTHHEAD. Gestural Control of Modular Synthesizer via Kinect. In: *Synthtopia* [online]. 2013 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.synthtopia.com/content/2013/03/05/gestural-control-of-modular-synthesizer-via-kinect/>
- [28] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [29] SYROVÝ, Václav. Hudební signál a jeho syntéza. In: *Živá hudba*. s. 205.
- [30] ŠTĚTINA, Josef, Michal JAROŠ a Pavel RAMÍK. Virtuální laboratoř - měření: Piezoelektrické snímače. In: *Energetický ústav: Obor fluidního inženýrství Viktora Kalana* [online]. Brno, 2003 [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-05.htm>
- [31] Tech. *Mimugloves* [online]. London [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <http://www.mimugloves.com/tech/>
- [32] VISI, Federico, Esther COOREVITS, Rodrigo SCHRAMM a Eduardo Reck MIRANDA. Musical Instruments, Body Movement, Space, and Motion Data: Music as an Emergent Multimodal Choreography. In: *Human Technology* [online]. 2017, **13**(1), s. 58-81 [cit. 2017-06-04]. DOI: 10.17011/ht/urn.201705272518. ISSN 17956889. Dostupné z: http://humantechnology.jyu.fi/archive/vol-13/issue-1/musical-instruments-body-movement-space-and-motion-data/@@display-file/fullPaper/Visi_Coorevits_Schramm_Reck-Miranda.pdf
- [33] CARBONNAUX, Antoine. Sound On Intuition Translates Body Movements Into Music. In: *Motherboard* [online]. 2013 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: https://motherboard.vice.com/en_us/article/sound-on-intuition-translates-body-motion-into

Seznam použitých fyzikálních veličin a symbolů

$a_0 \dots a_n$	Koeficienty polynomické a exponenciální aproximační funkce
$b_0 \dots b_n$	Koeficienty aproximace po částech přímkou
f_k	Frekvence k-tého členu Fourierovy transformace
f_m	Frekvence modulačního signálu
f_{vz}	Vzorkovací kmitočet
Δf	Frekvenční zdvih
ϕ	Fáze modulovaného signálu
J_n	Besselova funkce
k	Pořadí členů FFT
m_{FM}	Index frekvenční modulace
N	Počet členů FFT
Ω	Nosná úhlová frekvence
ω	Modulační úhlová frekvence
N	Počet členů FFT
r_i	Odchylka modelu
t	Čas
u	Okamžitá výchylka modulovaného signálu
U	Amplituda modulovaného signálu
u_m	Okamžitá výchylka modulačního signálu
U_m	Amplituda modulačního signálu
u_n	Okamžitá výchylka vstupního harmonického signálu
U_n	Amplituda vstupního harmonického signálu
x	Vstupní signál
X	Amplituda vstupního harmonického signálu (FFT)
y	Výstupní signál
Y_k	Amplituda k-tého členu FFT

Seznam příloh

Příloha č. 1 – DVD s elektronickou verzí práce a kódem softwaru.....	38
--	----